第27卷　第5期　腐蚀科学与防护技术　Vol.27　No.5
2015年9月　CORROSION SCIENCE AND PROTECTION TECHNOLOGY　Sep.　2015

专题介绍

阵列电极技术在腐蚀领域的应用进展

范　林[1]　邢　青[1,2]　邱　日[1]　张慧霞[1]　郭为民[1]　侯　健[1]

1. 中国船舶重工集团公司第七二五研究所青岛分部 海洋腐蚀与防护重点实验室 青岛 266101;
2. 江苏科技大学 材料科学与工程学院 镇江 212000

摘要: 阵列电极是由一系列规则排列的微电极阵列组成的复合电极，可以实现传统电化学测量中对大面积电极的统计平均信号的获取，而且可以给出电极微区的电位和电流大小和分布信息，从而准确表征电极表面的电化学不均匀性。本文就阵列电极技术在腐蚀领域的应用进展，及其优势与不足进行了总结，并对该技术的发展前景进行了展望。

关键词: 金属材料　阵列电极　局部腐蚀　微区电化学

中图分类号: TG174　**文献标识码:** A　**文章编号:** 1002-6495(2015)05-0509-05

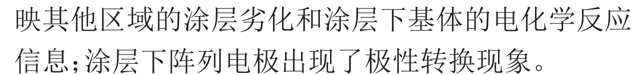
1 前言

由于金属材料的腐蚀本质上是电化学过程，因此许多直流和交流电化学技术已被用于腐蚀行为和规律的研究中。但是这些传统电化学技术通常以金属电极整体为研究对象，测试结果仅能反映电极表面总体的平均信息，故而无法获得电极局部的腐蚀特征[1]。阵列电极，又称丝束电极或微电极阵列，是由一系列规则排列的电极丝组成的复合电极。它是基于微积分的原理，将一个大面积电极分割成若干个微电极，然后将这些微电极重新组合排列，互相绝缘并进行封装来模拟大面积电极。因此，各个微电极既能相互耦合作为大面积电极使用，给出大面积电极所提供的统计平均信号，又能作为独立的微小探头，分别测试该微小区域的电化学参数，给出大面积电极无法提供的表面参数分布及差异大小等重要信息，表征电极表面的电化学不均匀性[2]。所以从阵列电极的腐蚀电位/电流分布及其变化，可以判别金属微区的腐蚀趋势差异，它具有常规电极和单个微电极都不能比拟的优越性[3]。阵列电极最初是用来检测有机涂层的局部缺陷，近年来被大量应用于研究金属涂覆层的防护性能，材料表面的电化学腐蚀特征，以及不同类型的局部腐蚀，并取得了许多研究成果[4,5]。本文综述了阵列电极在腐蚀领域的应用进展，并对其应用前景进行了展望。

定稿日期: 2014-11-28
基金项目: 中国科学院海洋环境腐蚀与生物污损重点实验室开放基金项目 (MCKF201408) 资助
作者简介: 范林，男，1982年生，博士，工程师
通讯作者: 范林，E-mail: fanl@sunrui.net，研究方向为金属腐蚀与防护
DOI: 10.11903/1002.6495.2014.364

2 阵列电级技术在有机涂层失效研究中的应用

有机涂层/金属界面腐蚀电位的测量有助于研究复合材料界面腐蚀破坏机理，评价有机聚合物涂覆层的耐蚀性能。然而，由于有机涂层/金属界面腐蚀破坏的“闭塞”条件和有机涂层的高绝缘性，传统的电化学方法均不能直接获得有机涂层/金属界面二维空间的腐蚀电位分布，难以直接研究有机涂层/金属界面的腐蚀破坏过程及相关的影响因素。阵列电极技术则使深入研究有关腐蚀粒子在聚合物相内的传输过程，聚合物涂层的不均一性及缺陷分布，以及涂层/金属界面腐蚀的发生、发展机制成为可能。林昌健等[6,7]应用阵列电极技术首次原位探测了聚合物涂层缺陷的分布及不均一性，并研究了聚合物涂层缺陷诱导聚合物/金属界面腐蚀破坏的作用，还首次给出了在涂层/金属界面腐蚀破坏发展过程中阴、阳极同时存在、共同发展的直接的实验证据。Wang等[8,9]用阵列电极技术研究了PANI在铝合金上的电聚合过程及其在0.5 mol/L NaCl溶液中的防腐蚀效果，发现聚合阳极电流的分布均匀性与是否存在氧化膜有关，阳极电流大小受浸泡时间的影响，且阳极区域随机变换。王佳的课题组[10,11]结合阵列电极和电化学阻抗谱 (EIS) 技术研究了缺陷涂层在海水中的劣化过程。研究发现，阵列电极表面的电流密度分布与EIS的响应特征能够良好的对应，两者结合使用可以实现对表面任意局部阳极区和阴极区腐蚀过程的表征；涂层阵列电极的总阻抗响应主要与涂层局部缺陷最严重处的电极过程相对应，而不能反


映其他区域的涂层劣化和涂层下基体的电化学反应信息;涂层下阵列电极出现了极性转换现象。

3 阵列电级技术在防锈缓蚀机理研究中的应用

Zhong等[12,13]最早采用阵列电极体系的极化电阻方块图统计法解决了单电极方法在研究防锈油膜下金属的腐蚀机理时可重现性差的难题,为快速、准确的判别防锈液阻锈性能提供了一种新方法。钟立杰等[14]采用阵列电极研究防锈油膜防护过程中的腐蚀电位的变化规律时发现,防锈油膜的腐蚀电位呈先增大后减小的趋势,最终趋于基体金属的自腐蚀电位。陈迪平等[15]认为根据阵列电极的电阻分布可以判别防锈液的防锈性能:在低电阻区出现的电极数越多,则防锈液的防锈能力越弱,反之则越强。同时,他们还指出阵列电极的测量结果和经典试验结果能较好的对应,且阵列电极技术具有时间短、可定量的优势。董泽华等[16]在研究模拟碳化混凝土孔隙液中缓蚀剂对碳钢局部腐蚀的抑制行为时,以阵列电极的腐蚀在时间和空间上的发生和发展来表征缓蚀剂对碳钢局部腐蚀的修复能力,并提出了局部腐蚀因子的概念,用于定量描述阵列电极腐蚀的不均匀性和局部腐蚀的严重程度,推动了阵列电极技术从单纯的对局部腐蚀电位/电流分布的定性判断向定量化的发展。Tan等[17]采用阵列电极研究咪唑啉和间苯二酚酸对钢的缓蚀作用时发现,咪唑啉会通过在阵列电极表面小范围内诱发少量的大阳极而加重局部腐蚀,导致强烈的局部阳极溶解;间苯二酚酸则会通过在阵列电极表面形成大量随机分布的小阳极,弱化阳极电流并促进其随机分布,从而对局部腐蚀提供有效的抑制作用。由此可见,阵列电极技术在定性乃至定量评价防锈剂、缓蚀剂对材料腐蚀,尤其是局部腐蚀的抑制行为上具有巨大的优越性。

4 阵列电级技术在薄液膜下腐蚀研究中的应用

在薄层液膜条件下,电解质中的电位、电流、电阻、传质过程,以及金属表面状态均存在不均匀分布现象,传统的电化学方法难以对其进行测量,而阵列电极技术则可以准确的测量这种微量电解质体系中的电化学参数大小及其分布情况[18]。刘圆圆等[19]利用阵列电极技术研究了NaCl液滴下304不锈钢表面电化学参数分布及其随腐蚀时间的变化规律,结果表明,液滴下不锈钢阵列电极表面的腐蚀电位分布和电偶电流分布均呈现空间、时间上的不均匀性;阵列电极表面随机形成局部阴极区和阳极区,而且随腐蚀时间的延长局部区域极性发生反转。Liu等[20]也认为阵列电极有助于薄层液膜下金属腐蚀过程的研究。他们对薄层海水液膜下电极腐蚀电流变化的测量结果表明,碳钢在薄层海水液膜下的腐蚀速率显著高于全浸试样,氧的扩散层厚度约500 μm,最大电流出现在临界液膜厚度(40 μm)下,此时腐蚀过程由阴极控制转变为阳极控制。

5 阵列电级技术在钢筋混凝土腐蚀研究中的应用

基于钢筋混凝土复杂的腐蚀体系特点,阵列电极技术的应用有着重要的实际价值。它可以直接跟踪测量混凝土中腐蚀宏电池和微电池的发生、发展过程,探究微电极耦合电流与单电极电流在钢筋腐蚀过程中的电化学特征、相互关系和作用机理。李兰强等[21]建立了一维阵列微电极技术,通过对阵列电极腐蚀电位、极化曲线以及微电极短接后宏电流的测量,发现在腐蚀发生早期,腐蚀宏电池和微电池在不同区域形成并共存,随着腐蚀的发展和它们之间的相互作用,两者的电流大小最终趋于一致。Shi等[22]应用阵列电极技术研究了混凝土下钢筋的腐蚀,发现氧的耗尽导致阵列微电极开路电位的降低,阴极去极化作用的减弱造成各区域电位和电流差异的减小;腐蚀产物会引起钝化微电极的点蚀,但混凝土的高阻抗限制了腐蚀电流向微电极远端的传输,这导致在混凝土和钢筋的界面上,强阳极区通常出现在强阴极区附近。

6 阵列电级技术在局部腐蚀研究中的应用

根据金属被破坏的基本特征,可以把腐蚀分为全面腐蚀和局部腐蚀。对于全面腐蚀,其腐蚀速率可以通过电阻探针、线性极化探针等进行监检测,并可以依靠在设计中预留足够的裕量来解决;而局部腐蚀一旦发生,则很难抑制,极容易形成小阳极、大阴极的腐蚀电池而加速腐蚀。此外,局部腐蚀通常发生在很小的区域,传统的腐蚀监检测方法无法对其展开测量。阵列电极技术可以实现对电极表面微区的定位电化学测量,为电偶腐蚀、点蚀等局部腐蚀行为的深入研究提供帮助。

6.1 电偶腐蚀

借助于阵列电极技术,对异种材料构成的宏电池电偶腐蚀行为的研究已取得了重要的进展,它也为涂层失效和电偶腐蚀交互作用的研究提供了便利。刘华剑[23]将阵列电极技术应用于有机涂层下船用钢电偶腐蚀规律的研究,由此得到了涂层下不同位置的电流密度分布,监测了涂层失效过程和涂层下钢的电偶腐蚀情况。结果表明,在长周期浸泡试验中,涂层下阵列电极的阴极和阳极存在转移现

象。初始破损区为阳极,涂层完好区为阴极;阴极区加速涂层破损后成为阳极区,而阴极区转移至其他完好区,此过程的持续进行导致整个涂层的失效。另一方面,阵列电极技术也赋予了电偶腐蚀研究中偶对电极材料的选用和设计以极大的灵活性。张大磊等[24,25]采用不同截面积比的锌丝和钢丝制作的阵列电极模拟镀锌碳钢表面存在缺陷时的电偶腐蚀行为。结果表明,锌丝能给钢丝提供足够的阴极保护,且锌丝之间存在明显的电位、电流分布不均现象,主要阳极区先随机地在邻近钢丝的锌丝区域内转移,而后逐渐向远端锌丝扩展;钢丝之间也存在电化学参数分布不均一现象,钢丝在受到保护的同时表面会有氢原子析出,且随着阴、阳极面积比的增大,析氢电流密度逐渐减小。

6.2 缝隙腐蚀

阵列电极排布的二维有序性使其在模拟缝隙结构和测量不同缝隙深度处的电化学参数方面表现出优势。钟庆东[26]采用阵列电极研究了Cu在5%NaCl溶液中的缝隙腐蚀行为。结果表明,缝隙内Cu的腐蚀电位分布是不均匀的,相差达数十毫伏。在缝隙腐蚀初期,铜的腐蚀电位随着缝隙腐蚀的发生逐渐正移;随着缝隙腐蚀程度的加重,铜的腐蚀电位发生负移,且逐渐趋于均匀分布,证实了该过程与经典缝隙腐蚀机理的一致性。曲文娟等[27]采用有机玻璃模拟剥离电路板上的包覆层,通过螺丝控制固定印刷电路板及有机玻璃之间所形成的缝隙大小,建立了模拟印刷电路板缝隙腐蚀的装置,发展了用阵列电极测量缝隙内电路板表面铜在NaCl溶液中的腐蚀电位的方法,并研究了多因素对缝隙腐蚀行为的影响。结果表明,缝隙内铜的电位与缝隙大小、浸泡时间、NaCl浓度、溶液pH和温度有关。

6.3 点蚀

阵列电极技术在对点蚀萌生和发展的研究中也有突出的表现。Tan[28]采用阵列电极的测量数据分析了电极不均匀性 (EI) 和电化学不均匀性 (EH) 对点蚀形核的作用,并针对裸金属确定了两种点蚀形核机制。对处于自然腐蚀或弱阳极极化状态下的阵列电极,点蚀的形核归因于小阳极的消失,这导致剩余大阳极的加速溶解。在此状态下,点蚀形核阶段受EI控制,而扩展阶段由EH决定;对于强阳极极化下的阵列电极,点蚀的形核归因于活性阳极新位点的形成,这与点蚀形核的传统解释相符。后来他们借助阵列电极所测量的宏电池电流数据,采用局部腐蚀强度因子定量分析了钢的局部腐蚀程度和局部腐蚀的衰减效率。研究[29]发现,局部腐蚀强度因子数值的变化对应于腐蚀机制的改变,该数值的骤减意味着材料表面局部腐蚀强度的减弱,腐蚀行为由点蚀向均匀腐蚀转变。

6.4 微生物腐蚀

阵列电极技术近年来也开始用于材料/微生物界面电化学行为的表征。张霞等[30]利用阵列电极技术研究了模拟微生物膜/金属界面局部腐蚀电位、腐蚀电流的分布规律与膜内过氧化氢分布的相关性,从局部电位和电流分布特征方面对微生物膜内形成的过氧化氢所致的电位正移做出了解释。Dong等[31]采用阵列电极技术和电化学阻抗谱表征了硫酸盐还原菌 (SRB) 生物膜下低碳钢的局部腐蚀行为,SRB膜下阵列电极的电位/电流分布结果表明,由于阵列微电极被SRB生物膜内的高导电性硫酸盐沉积物所短接,电位映射并不能反应生物膜下钢的局部腐蚀,而电流映射则可以实现对非均匀腐蚀的表征。

6.5 在其他局部腐蚀行为研究中的应用

金属在浸入腐蚀介质中时,水线位置由于气液两相交界线溶氧不同构成氧浓差电池而显示高腐蚀速率,是一种非全面腐蚀现象。其常用的研究方法有传统电化学方法、失重法、显微观察法,近年来有学者将阵列电极技术成功的应用于对水线腐蚀的研究。Tan等[32]应用阵列电极技术监测了水线腐蚀的动态过程,并根据长时间的浸泡结果计算出了水线腐蚀的深度图,得到了水线腐蚀的表面形貌变化及阴极区的分布情况。张雪[33]利用阵列电极研究了碳钢的水线腐蚀机理,以及电极尺寸、氯离子浓度等因素对水线腐蚀行为的影响。11×11型的阵列电极在海水中的腐蚀行为表明,水线下的电极因溶氧量不充分发生腐蚀,此处金属材料的腐蚀对水线位置处的金属起到保护作用,腐蚀微区阴、阳极电流密度的不平衡造成自加速腐蚀反应;长尺寸的阵列电极(4×30型)在海水中的腐蚀行为表明,阴极区和阳极区因距离水线的远近以及浸泡时间的延长而发生转变。

尽管传统电化学方法能够方便的给出金属焊接后腐蚀活性增大的信息,但其中均匀腐蚀和局部腐蚀倾向均显著增强,难以得到腐蚀活性的空间分布信息。阵列电极技术则可以弥补其不足,用以表征母材及焊缝不同区域的电化学差异。除了以阵列电极为研究电极模拟局部腐蚀的方法外,还有人提出了建立阵列参比电极的方法。杨旺火等[34]应用自行建立的阵列参比电极原位测量了316不锈钢焊接试样在12%$FeCl_3$溶液中的腐蚀电位分布,结果表明,

浸泡最初时刻焊缝区发生优先腐蚀，而母材区保持钝化状态；随着浸泡时间延长，焊缝区电位不断负移，局部腐蚀加剧，并达到最大值；浸泡45 min，母材局部发生电位负移，并发生腐蚀。这也为局部腐蚀优先在焊缝和热影响区的发生提供了直接的电化学热力学上的解释。

阵列电极不仅限于对一维或二维有序结构的模拟，也可以实现对具有特殊空间几何形状的结构的模拟。Zhang等[35]将阵列电极技术和计算流体动力学模拟相结合用于管道弯头的流体加速腐蚀的研究。鉴于管道弯头几何形状的特殊性，不同于常规平面式的电极阵列模式，他们所设计的阵列电极延弯头内外壁曲面呈弧形排列。结果表明，弯头内壁的腐蚀速率高于外壁，最大腐蚀速率出现在弯头内壁的近心端，对应于流速和剪切应力均最高的位置。

7 结束语

由阵列电极技术在实际应用中的成功案例可见，阵列电极作为一种新型的微区电化学测试方法，与传统电化学方法和其他局部电化学测量手段相比，具有以下优点：测量速度快，可同时捕获电极阵列范围内各微电极区域的电化学特征的差异；测量准确、便于原位监测，可实现对局部腐蚀程度的定性和定量分析；设计灵活性强，可实现对不同腐蚀形式、不同结构部件的模拟；不受研究电极表面平整度、覆盖状态的限制；尤其对于非直接暴露表面、液膜下的金属基底和涂层或包覆结构/金属界面等常规电极不易检测的部位，阵列电极表现出巨大的优势。近来，学术界不再满足于单纯由阵列电极技术获取的电位和电流大小和分布信息，有学者已尝试将阵列电极技术与其他分析和测试手段，如电化学阻抗谱、计算机模拟等相结合，以综合评价材料的腐蚀行为。因此，阵列电极技术将被越来越多的应用于腐蚀电化学、表面和界面物理化学、材料保护等研究领域。但是，目前所采用的阵列微电极针尖尺寸多处于毫米数量级，这限制了其检测精度，微电极间距过高又降低了其空间分辨率，因此必须缩小电极尺寸和间距，以提高阵列电极的测量准确性。在阵列电极的设计制作过程中，如何保证微电极表面状态的一致性，减小微电极噪音信号差异，也是需要克服的难题。另外，对于应力腐蚀开裂、腐蚀疲劳这类危害性大、发生的随机性强、裂纹区电化学性质差异大的局部腐蚀类型，阵列电极技术的应用还未见报道，因此需进行探索性试验以拓宽该技术的应用领域。

参考文献

[1] 王力伟, 李晓刚, 杜翠薇等. 微区电化学测量技术进展及在腐蚀领域的应用 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(6): 498

[2] 杨瑞, 李焰. 丝束电极技术在局部腐蚀研究中的应用 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2014, 26(3): 259

[3] 李远利, 雍歧卫, 刘志. 管道防腐涂层新发展 [J]. 涂料工业, 2007, 37(2): 55

[4] Wang W, Jenkins P E, Ren Z Y. Electrochemical corrosion of carbon steel exposed to biodiesel/simulated seawater mixture [J]. Corros. Sci., 2012, 57: 215

[5] 吴红艳, 周琼宇, 钟庆东等. 阵列电极研究F^-对铜在5%Na_2SO_4溶液中腐蚀电化学行为的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(7): 1614

[6] Lin C J, Zhuo X D, Chen J D, et al. Corrosion potential imaging at the interface of coating/metal by a new electrochemical technique [J]. Electrochemistry, 1996, 2(2): 144

[7] 胡荣宗, 林昌健, 何瑞延等. 用阵列电极研究不同阴离子介质中有机涂层/铁电极界面腐蚀行为 [J]. 厦门大学学报 (自然科学版), 1997, 36(6): 869

[8] Wang T, Tan Y J. Understanding electrodeposition of polyaniline coatings for corrosion prevention applications using the wire beam electrode method [J]. Corros. Sci., 2006, 48(8): 2274

[9] Wang T, Tan Y J. Electrodeposition of polyaniline on aluminium alloys for corrosion prevention- A study using the wire beam electrode (WBE) [J]. Mater. Sci. Eng., 2006, B132(1/2): 48

[10] 张伟, 王佳, 李玉楠等. WBE联合EIS技术研究缺陷涂层下金属腐蚀 [J]. 物理化学学报, 2010, 26(11): 2941

[11] 刘杰, 王伟, 王佳. 结合EIS和WBE技术环氧涂层劣化 [J]. 材料科学与工艺, 2013, 21(5): 33

[12] Zhong Q D. Wire beam electrode: a new tool for investigating inhomogeneity of temporarily protective oil coating [J]. Prog. Org. Coat., 1997, 30(4): 279

[13] Zhong Q D. Electrochemical technique for investigating temporarily protective oil coatings [J]. Prog. Org. Coat., 1997, 30(4): 213

[14] 钟立杰, 黄福川. 防锈油膜的电位特性研究 [J]. 化学工程与装备, 2010, 9: 36

[15] 陈迪平, 黄桂芳, 曾云等. 丝束电极研究水基防锈液的防锈性能 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2007, 34(4): 56

[16] 董泽华, 石维, 郭兴蓬. 用丝束电极研究模拟碳化混凝土孔隙液中缓蚀剂对碳钢局部腐蚀的抑制行为 [J]. 物理化学学报, 2011, 27(1): 127

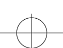
[17] Tan Y J, Mocerino M, Paterson T. Organic molecules showing the characteristics of localized corrosion aggravation and inhibition [J]. Corros. Sci., 2011, 53(5): 2041

[18] 李亚坤, 王佳, 胡凡等. 薄液层下金属腐蚀行为研究方法的进展 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2007, 19(6): 423

[19] 刘圆圆, 王伟, 王燕华等. NaCl液滴下304不锈钢表面电化学性质研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2012, 32(1): 28

[20] Liu Z J, Wang W, Wang J, et al. Study of corrosion behavior of carbon steel under seawater film using the wire beam electrode method [J]. Corros. Sci., 2014, 80: 523

[21] 李兰强, 董士刚, 杜荣归等. 一维阵列电极法研究钢筋在混凝土中的腐蚀行为 [J]. 电化学, 2010, 16(1): 60



[22] Shi W, Dong Z H, Kong D J, et al. Application of wire beam electrode technique to investigate initiation and propagation of rebar corrosion [J]. Cem. Concr. Res., 2013, 48: 25

[23] 刘华剑. 有机涂层下船用钢电偶腐蚀规律研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011

[24] 张大磊, 王伟, 金有海等. 丝束电极研究镀锌层存在点缺陷的锌/钢电偶腐蚀行为 [J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(9): 2168

[25] Zhang D L, Wang W, Li Y. An electrode array study of electrochemical inhomogeneity of zinc in zinc/steel couple during galvanic corrosion [J]. Corros. Sci., 2010, 52(4): 1277

[26] 钟庆东. 采用丝束电极研究金属的缝隙腐蚀 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 1999, 19(3): 189

[27] 曲文娟, 杜荣归, 卓向东等. 印刷电路板缝隙腐蚀行为研究 [J]. 材料保护, 2008, 41(2): 4

[28] Tan Y J. Understanding the effects of electrode inhomogeneity and electrochemical heterogeneity on pitting corrosion initiation on bare electrode surfaces [J]. Corros. Sci., 2011, 53(5): 1845

[29] Tan Y J, Aung N N, Liu T. Evaluating localized corrosion intensity using the wire beam electrode [J]. Corros. Sci., 2012, 63: 379

[30] 张霞, 王伟, 王佳. 利用丝束电极技术研究模拟微生物膜/金属界面的电化学不均匀性 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2009, 21(3): 242

[31] Dong Z H, Shi W, Ruan H M, et al. Heterogeneous corrosion of mild steel under SRB- biofilm characterized by electrochemical mapping technique [J]. Corros. Sci., 2011, 53(9): 2978

[32] Tan Y J, Bailey S, Kinsella B. Mapping non-uniform corrosion using the wire beam electrode method. III. Water-line corrosion [J]. Corros. Sci., 2001, 43(10): 1931

[33] 张雪. 利用阵列电极研究水线腐蚀的机理 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013

[34] 杨旺火, 胡融刚, 叶陈清等. 阵列参比电极法研究316不锈钢焊缝腐蚀行为 [J]. 电化学, 2011, 17(4): 373

[35] Zhang G A, Zeng L, Huang H L, et al. A study of flow accelerated corrosion at elbow of carbon steel pipeline by array electrode and computational fluid dynamics simulation [J]. Corros. Sci., 2013, 77: 334

